



Identification and Prioritization of Factors Affecting the Location of Safe Shelters and Emergency Evacuation Routes in Process Industries Using the Analytic Hierarchy Process

Zahra Barkhordarian^a, Masoud Nasouri^{a*}

^aDepartment of Environmental Planning, Management and HSE, Aras International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: nasouri@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-4145-3969>

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 2026/08/16

Received in revised form:
2026/09/13

Accepted 2026/09/21

Available online: 2026/09/22

Keywords:

Analytic Hierarchy Process,
Process industries,
Emergency evacuation routes,
Safe shelter location.

ABSTRACT

Process industries, due to their operational nature and the presence of hazardous chemicals, are constantly exposed to extensive risks such as fire, explosion, and the release of toxic substances. Under such circumstances, the establishment of safe shelters and the designation of efficient emergency evacuation routes, as two fundamental components of the crisis management system, play a vital role in reducing human casualties and enhancing industrial resilience. The present study was conducted with the aim of identifying and prioritizing the factors affecting the location of safe shelters and the determination of emergency evacuation routes in process industries in scenarios such as the release of toxic substances using the Analytic Hierarchy Process approach. In this study, a review of scientific sources was first conducted to extract the key criteria influencing the location of safe shelters and the determination of emergency evacuation routes. Subsequently, utilizing an expert panel method (comprising 13 faculty members specializing in industrial safety and crisis management), the extracted criteria were validated and supplemented. The data collection instrument was a pairwise comparison questionnaire based on Saaty's scale (1 to 9). The final weights of the criteria were calculated using the AHP method, and the consistency of the judgments was confirmed through the calculation of the inconsistency ratio. The findings indicated that in the location of safe shelters, the criteria of "minimum exposure to hazardous materials" (C1) and "distance from the hazard source" (C2), with equal weights of 0.16, possess the highest priority. The criteria of "access to safe routes" (C3) and "optimal evacuation time" (C4) were ranked subsequently. Among the factors affecting the determination of emergency evacuation routes, the criterion of "susceptibility to the accident" (C3) with a weight of 0.22 had the highest priority, followed by "population distribution at the site" (C1) and "population density along the routes" (C2). Prioritizing the criteria of distance from hazard sources and route safety in the design of emergency management systems can effectively contribute to reducing human casualties, preventing widespread consequences, and enhancing the resilience of process industries. The findings of this study can serve as a foundation for developing location standards, revising comprehensive emergency response plans, and improving the level of safety in high-risk industrial units.

Cite this article: Barkhordarian, Z. & Nasouri, M. (2026). Identification and Prioritization of Factors Affecting the Location of Safe Shelters and Emergency Evacuation Routes in Process Industries Using the Analytic Hierarchy Process. *Strategies of Engineering Sciences and Sustainable Systems Management*, 2(2), 67-84. <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.597539.1026>



© The Author(s).

Publisher: Iranian Scientific Association of Waste Engineering and Management.

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.597539.1026>

Introduction

Process industries, due to their operational nature and the presence of hazardous chemicals, are inherently exposed to extensive risks including fire, explosion, and the release of toxic substances. The occurrence of accidents in these industries can result in catastrophic consequences, not only in terms of human casualties and financial losses but also with irreversible impacts on surrounding communities and the environment. When primary accidents occur in chemical facilities, the chain-like nature and physicochemical interactions between adjacent units create the potential for propagation to neighboring equipment, potentially leading to the "domino effect" phenomenon, which exacerbates the scale of the disaster.

The establishment of safe shelters and the designation of efficient emergency evacuation routes constitute two fundamental components of crisis management systems, playing a vital role in reducing human casualties and enhancing industrial resilience. Rescue centers in chemical industrial complexes serve as key operational infrastructure components within emergency management systems, responsible for providing and distributing emergency resources, personal protective equipment, and sheltering exposed individuals in a timely manner. Safe shelters serve a dual function: providing temporary accommodation for affected populations who lack alternative safe locations and offering specialized medical care for those requiring immediate attention. These shelters must possess adequate physical space to meet basic survival needs and primary healthcare services.

Emergency evacuation, defined as the purposeful relocation of individuals from identified hazard zones toward safe locations within the shortest possible time and with maximum reliability, represents a critical pillar of crisis response systems. Based on available warning time, emergency evacuation scenarios can be broadly classified into precautionary operations, where sufficient warning time enables pre-assessment and planning, and life-saving operations, characterized by limited or absent warning, necessitating immediate rescue of injured individuals and clearing of access routes.

Due to the inherent diversity of evacuation scenarios and their susceptibility to multiple and sometimes conflicting factors, selecting the best operational strategy requires simultaneous assessment of numerous indicators. Safety experts in process industries possess different perspectives regarding safety system evaluation indicators, naturally leading to different levels of importance for each indicator. Multiple-Criteria Decision-Making methods have emerged as efficient approaches for addressing these complexities. Among various MCDM methods, the Analytic Hierarchy Process, first introduced by Saaty in 1980, has become one of the most practical tools for integrating expert opinions and evaluating scores. Despite the breadth of studies in crisis management, limited research has specifically addressed the identification and prioritization of factors affecting the location of safe shelters and emergency evacuation routes in process industries using MCDM techniques. Therefore, this study was designed with the objective of identifying and prioritizing these factors using the Analytic Hierarchy Process approach.

Method

This study employed a systematic multi-stage methodology to identify and prioritize key factors affecting the location of safe shelters and emergency evacuation routes in process industries. Initially, a comprehensive review of credible scientific literature and previous studies in crisis management, process safety, and emergency facility location was conducted. Based on the findings, a set of criteria were extracted covering various aspects of the subject. The identified dimensions for ranking the location of safe shelters included: C1 (minimum exposure to hazardous materials), C2 (distance from hazard source), C3 (access to safe routes), C4 (optimal evacuation time), C5 (environmental and climatic requirements), C6 (potential for accident impact), C7 (easy access), C8 (emergency facilities and infrastructure), and C9 (minimum access time). Factors identified as effective in determining evacuation routes included: C1 (population distribution at the site), C2 (population density along routes), C3 (susceptibility to the accident), C4 (maximum route capacity), C5 (time from route to safe assembly point), and C6 (exit locations).

An expert panel comprising 13 faculty members specializing in occupational health and safety and crisis management was formed. All participants held doctoral degrees, with ages ranging from 31 to over 45 years and work experience spanning 1 to over 15 years, ensuring diversity of perspectives. A pairwise comparison questionnaire based on Saaty's standard scale (1 to 9) was designed to measure the relative

importance of each factor. The Consistency Ratio was calculated to assess inconsistency in judgments, with values less than 0.1 considered acceptable. The final weights of the criteria were calculated using the AHP method based on the pairwise comparison matrices.

Results

The results revealed distinct prioritization patterns for safe shelter location compared to emergency evacuation route criteria. For safe shelter location, the criteria of "minimum exposure to hazardous materials" (C1) and "distance from hazard source" (C2), with equal weights of 0.16, demonstrated the highest priority. The criterion of "access to safe routes" (C3) with a weight of 0.15 ranked third, followed by "optimal evacuation time" (C4) with a weight of 0.12 in fourth position. These four criteria collectively accounted for the highest weights, indicating their dominant influence in the decision-making process. In contrast, criteria including environmental and climatic requirements (0.09), potential for accident impact (0.11), easy access (0.09), emergency facilities and infrastructure (0.06), and minimum access time (0.07) exhibited lower priority.

For emergency evacuation route determination, the criterion of "susceptibility to the accident" (C3) with a weight of 0.22 demonstrated the highest priority. The criteria of "population distribution at the site" (C1) and "population density along routes" (C2) ranked second and third with weights of 0.20 and 0.19 respectively. These three criteria collectively received the highest weights, demonstrating their dominant influence in evacuation route design. The Consistency Ratio for all participants' judgments was confirmed within the acceptable range (less than 0.1), indicating internal consistency and appropriate reliability of the pairwise comparisons conducted.

Conclusions

The present study successfully identified and prioritized factors affecting the location of safe shelters and emergency evacuation routes in process industries using the Analytic Hierarchy Process approach. The findings revealed that for safe shelter location, the criteria of "minimum exposure to hazardous materials" and "distance from hazard sources" possess the highest priority, followed by "access to safe routes" and "optimal evacuation time," indicating the critical importance of distancing from hazards and speed of access in shelter design. Conversely, in determining emergency evacuation routes, the criterion of "susceptibility to the accident" demonstrates the highest importance, followed by "population distribution at the site" and "population density along routes," indicating the necessity of prioritizing route safety against process hazards.

Based on these findings, safety engineers should calculate minimum safe distances based on consequence modeling of critical scenarios and establish shelters outside hazard radii. In evacuation route design, network nodes exposed to domino effects should be eliminated and alternative routes with minimum hazard exposure should be determined using route optimization algorithms. Evacuation route capacity should be calculated based on maximum floating and working population per shift, and potential bottlenecks should be eliminated to optimize evacuation time. In revising comprehensive emergency response plans, higher-weight criteria should be defined as key performance indicators and compliance of existing shelters and routes should be monitored. Ultimately, prioritizing distance from hazard sources and route safety criteria in emergency management system design can effectively contribute to reducing human casualties, preventing consequences arising from domino effects, and enhancing resilience of process industries, providing an effective operational framework for safety engineers and crisis managers toward improving safety levels in high-risk industrial units.



شناسایی و اولویت بندی فاکتورهای مؤثر بر مکان یابی پناهگاه های ایمن و مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی با رویکرد تحلیل سلسله مراتبی

زهرا برخورداریان^a، مسعود نصوری^{a*}

^aگروه برنامه ریزی، مدیریت محیط زیست و HSE، پردیس بین المللی ارس، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: nasouri@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	صنایع فرایندی به دلیل ماهیت عملیاتی و حضور مواد شیمیایی خطرناک، همواره با مخاطرات گسترده ای نظیر آتش سوزی، انفجار و انتشار مواد سمی مواجه هستند. در چنین شرایطی، استقرار پناهگاه های ایمن و تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری کارآمد، به عنوان دو مؤلفه اساسی در سیستم مدیریت بحران، نقشی حیاتی در کاهش تلفات انسانی و افزایش تاب آوری صنایع ایفا می کنند. پژوهش حاضر با هدف شناسایی و اولویت بندی فاکتورهای مؤثر بر مکان یابی پناهگاه های ایمن و تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی در مواجهه با سناریوهایی نظیر انتشار مواد سمی با رویکرد تحلیل سلسله مراتبی انجام گردید. در این مطالعه، ابتدا با مرور برخی منابع علمی معتبر، معیارهای کلیدی مؤثر بر مکان یابی پناهگاه های ایمن و تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری استخراج گردید. سپس، با به کارگیری روش پل خبرگان (شامل ۱۳ نفر از اعضای هیئت علمی حوزه ایمنی صنعتی و مدیریت بحران)، معیارهای استخراج شده اعتبارسنجی و تکمیل شدند. ابزار گردآوری داده ها، پرسشنامه مقایسات زوجی مبتنی بر مقیاس ساعتی (۱ تا ۹) بود. وزن های نهایی معیارها با استفاده از روش AHP محاسبه و سازگاری قضاوت ها از طریق محاسبه نرخ ناسازگاری تأیید گردید. نتایج نشان داد که در مکان یابی پناهگاه های ایمن، معیارهای "حداقل میزان مواجهه با مواد خطرناک" و "فاصله از منبع خطر" با وزن مساوی ۰/۱۶، بالاترین اولویت را دارند. معیارهای "دسترسی به مسیرهای ایمن" با وزن ۰/۱۵ و "زمان بهینه تخلیه" با وزن ۰/۱۲ در رتبه های بعدی قرار گرفتند. در میان فاکتورهای مؤثر بر تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری، معیار "تأثیرپذیری از حادثه" با وزن ۰/۲۲ بالاترین اولویت را داشته و معیارهای "توزیع جمعیت در محل" و «چگالی جمعیت (تعداد) در مسیرها» به ترتیب با وزن های ۰/۲۰ و ۰/۱۹ در اولویت های بعدی قرار گرفتند. اولویت دهی به معیارهای فاصله از منابع خطر و ایمنی مسیر در طراحی سیستم های مدیریت اضطراری، می تواند نقش مؤثری در کاهش تلفات انسانی، جلوگیری از پیامدهای گسترده و افزایش تاب آوری صنایع فرایندی ایفا نماید. یافته های این مطالعه می تواند مبنایی برای تدوین استانداردهای مکان-یابی، بازنگری در طرح های جامع پاسخ به شرایط اضطرار و ارتقاء سطح ایمنی در واحدهای صنعتی با ریسک بالا قرار گیرد.
کلیدواژه ها: تحلیل سلسله مراتبی، صنایع فرایندی، مسیرهای تخلیه اضطراری، مکان یابی پناهگاه های ایمن.	

استناد به این مقاله: برخورداریان، زهرا و نصوری، مسعود (۱۴۰۵). شناسایی و اولویت بندی فاکتورهای مؤثر بر مکان یابی پناهگاه های ایمن و مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی با رویکرد تحلیل سلسله مراتبی. راهبردهای علوم مهندسی و مدیریت سیستم های پایدار، ۲(۲)، ۸۴-۶۷.

<https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.597539.1026>



© نویسندگان

DOI: <https://doi.org/10.22034/jsesm.2026.597539.1026>

ناشر: انجمن علمی مهندسی و مدیریت پسماند ایران

مقدمه

مواد شیمیایی خطرناک در فرایندهای تولید و ذخیره‌سازی، همواره با ریسک‌های قابل توجهی همراه هستند. وقوع نشت در این مواد، می‌تواند به پیامدهای فاجعه باری نظیر آتش‌سوزی، انفجار و مسمومیت‌های حاد منجر گردد که بیانگر ضرورت طراحی نظام‌های کارآمد واکنش سریع در مواجهه با سوانح شیمیایی است (He et al., 2025). حوادث اولیه در تأسیسات شیمیایی، به دلیل ماهیت زنجیره‌ای و تعاملات فیزیکی- شیمیایی میان واحدهای مجاور، پتانسیل سرایت به تجهیزات و مخازن هم جوار را داشته و می‌توانند به پدیده‌ای تحت عنوان "اثر دومینو" منجر گردند که خود تشدیدکننده ابعاد فاجعه است (He et al., 2025). شواهد تجربی حاکی از آن است که در پژوهشی مبتنی بر تحلیل آماری ۲۰۷ حادثه‌ی بزرگ شیمیایی، حدود ۳۹ درصد از موارد شامل پدیده دومینو شناسایی شده‌اند که بیانگر فراوانی غیر قابل چشم‌پوشی این الگوی حوادث در صنایع فرایندی می‌باشد (Kourniotis & Markatos, 2000).

از منظر پیامدشناسی، اثر دومینو می‌تواند خسارات جانی و مالی را به مراتب فراتر از سناریوی اولیه افزایش دهد. نمونه بارز آن، حادثه انفجار شیمیایی ۲۱ مارس ۲۰۱۹ در استان جیانگ سوی چین است که در پی احتراق خودبه‌خودی ضایعات حاوی نیترات رخ داد و با گسترش آتش‌سوزی به مخازن ذخیره‌سازی و انبارهای متعدد، به انفجارهایی زنجیره‌ای انجامید. این رویداد، نهایتاً به فوت ۷۸ نفر و مصدومیت ۷۱۶ تن انجامید که گویای شدت اثرات توسعه یافته دومینو در مقیاس وسیع است (Zhang et al., 2019). بنابراین، شناسایی ریسک‌های بالقوه در صنایع فرایندی، به‌ویژه سناریوهایی که امکان ایجاد اثر دومینو در سطوح چندگانه دارند، می‌بایست به عنوان یکی از مولفه‌های اساسی در فرآیندهای مدیریت اضطراری، برنامه‌ریزی واکنش و تدوین راهکارهای پیشگیرانه مد نظر قرار گیرد. غفلت از این جنبه، می‌تواند به نقص‌های سیستمی در مهار بحران و افزایش آسیب‌پذیری جوامع پیرامونی بینجامد (Jiang et al., 2023). مراکز نجات اضطراری در مجتمع‌های صنعتی شیمیایی، به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی و زیرساخت‌های عملیاتی در نظام مدیریت اضطراری و واکنش سریع محسوب می‌شوند. این مراکز، وظیفه تامین و توزیع به هنگام منابع اضطراری، تجهیزات حفاظت فردی و پناه‌گیری افراد در معرض را بر عهده دارند که نقشی حیاتی در مهار اولیه سوانح و کاهش پیامدهای ثانویه ایفا می‌نمایند (Zhang et al., 2017). از منظر مدیریت پیش‌دستانه، مکان‌یابی و استقرار پیشین این مراکز، نه تنها به عنوان یک اقدام ضروری در راستای تضمین آمادگی عملیاتی پیش از وقوع حادثه مطرح است، بلکه بر کارایی فرایند پاسخ دهی، کاهش زمان واکنش و بهینه سازی تخصیص منابع در شرایط بحرانی تأثیری مستقیم دارد. به عبارتی، هرگونه تاخیر در دسترسی به مراکز اضطراری می‌تواند زنجیره واکنش مؤثر را مختل ساخته و احتمال وقوع اثر دومینو یا گسترش دامنه حادثه را افزایش دهد (Jiang et al., 2023).

در صنایع فرایندی، وقوع حوادث بزرگ مقیاس همواره با ضرورت اسکان موقت جمعیت‌های آسیب دیده و مدیریت تخلیه اضطراری همراه است (Zhang et al., 2023). پناهگاه‌های ایمن، نقشی دوگانه در پاسخ‌گویی به دو گروه اصلی از قربانیان ایفا می‌کنند: نخست، افرادی که امکان اسکان در مکان‌های امن دیگر را ندارند و دوم، آسیب دیدگانی که نیازمند مراقبت‌های ویژه پزشکی می‌باشند (Li et al., 2012). این پناهگاه‌ها می‌بایست دارای فضای فیزیکی کافی جهت تأمین نیازهای اساسی زیستی و خدمات درمانی اولیه باشند. اسکان مجدد قربانیان، می‌بایست بر اساس اصل تطبیق پویای عرضه و تقاضای منابع اضطراری صورت پذیرد؛ به گونه‌ای که نه تنها نیازهای افقی و متنوع معیشتی و درمانی آنان برآورد گردد (Pérez-Galarce et al., 2017)، بلکه کیفیت خدمات نیز در بازه‌های زمانی مختلف ارتقاء یافته و پاسخگوی نیازهای عمودی رو به افزایش قربانیان باشد (Zhao et al., 2019).

در صنایع فرایندی، پناهگاه‌های اضطراری به عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی مدیریت بحران محسوب می‌شوند که کارکرد اصلی آن‌ها، فراهم‌آوری بستری امن برای تخلیه سریع و اسکان موقت نیروی انسانی شاغل، بازدیدکنندگان

و جمعیت شناور مستقر در محدوده صنعتی، در هنگام وقوع حوادث بزرگ مقیاس نظیر آتش‌سوزی، انفجار، انتشار مواد سمی یا شکست سازه‌ای می‌باشد. این فضاها، ضمن تامین حداقل امکانات زیستی شامل سرپناه مقاوم، آب آشامیدنی سالم، تجهیزات بهداشتی، تهویه مناسب و ارتباطات اضطراری، نقشی کلیدی در کاهش تلفات انسانی و تسهیل عملیات امداد و نجات ایفا می‌نمایند. با این وجود، خدمات ارائه شده توسط پناهگاه‌های اضطراری در صنایع فرایندی، هم از جنبه عرضه (ظرفیت، تجهیزات، دسترسی) و هم از جنبه تقاضا (تعداد پرسنل، نوع مواجهه، شدت آسیب)، دارای دو بعد مکانی و غیرمکانی می‌باشند. بعد مکانی شامل عواملی نظیر موقعیت پناهگاه نسبت به مراکز خطر (مخازن، راکتورها، تأسیسات فرایندی)، شعاع پوشش، توزیع فضایی پناهگاه‌ها و هم پوشانی حوزه‌های خدماتی در سطح مجتمع صنعتی است؛ در حالی که بعد غیرمکانی به کیفیت تجهیزات حفاظتی، ظرفیت پذیرش، تنوع خدمات درمانی، سطح آمادگی عملیاتی و قابلیت اطمینان سیستم‌های پشتیبان باز می‌گردد (Cao et al., 2022; Jiang et al., 2023; Li et al., 2021; Zhang et al., 2023).

تخلیه اضطراری، به عنوان یکی از ارکان اساسی نظام پاسخ‌گویی به بحران، نقشی حیاتی در مدیریت سوانح ایفا می‌نماید. این فرایند را می‌توان به مثابه جا به جایی هدفمند ساکنان از منطقه‌ای که به عنوان محدوده خطر شناسایی شده است، به سوی مکان‌های امن، در کوتاه‌ترین زمان ممکن و با حداکثر سطح قابلیت اطمینان، تعریف نمود. اگرچه اصول بنیادین پاسخ‌گویی به بلایا و اجرای تخلیه، در کلیت انواع سناریوهای حادثه مشترک است، اما هر رویداد خاص، ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر میزان هشدار در دسترس، مخاطرات پیش روی امدادگران، احتمال وقوع رویدادهای ثانویه، عملیات بازیابی مورد نیاز و دامنه و مقیاس خسارات وارده را به همراه دارد که ماهیت و پیچیدگی فرایند تخلیه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بر اساس میزان هشدار موجود، سناریوهای تخلیه اضطراری را می‌توان به دو دسته کلی طبقه‌بندی نمود: عملیات احتیاطی و عملیات نجات جان. در تخلیه احتیاطی، به دلیل وجود زمان کافی برای هشداردهی، امکان برآورد پیشین مدت زمان تخلیه در مقایسه با زمان انتشار خطر و ارزیابی اولیه سطح ریسک، وجود دارد؛ از این‌رو، زمان پاسخ‌دهی و مخاطرات بالقوه، به عنوان مولفه‌های کلیدی در این نوع تخلیه مطرح می‌شوند. در مقابل، در عملیات نجات جان، کمبود یا فقدان هشدار کافی، مانع از انجام برنامه‌ریزی پیش از حادثه توسط سازمان‌دهندگان می‌گردد؛ بنابراین، تخلیه نجات بخش بر نجات فوری افراد مجروح در داخل و پیرامون منطقه آسیب دیده و همچنین پاکسازی مسیرهای دسترسی متمرکز است (Osman, 2012; Osman, 2013).

با توجه به تنوع ذاتی سناریوهای تخلیه و تأثیرپذیری آن‌ها از عواملی چندگانه و بعضاً متضاد، انتخاب بهترین راهکار عملیاتی در هر شرایط، نیازمند سنجش هم‌زمان شاخص‌های متعدد و گاه ناسازگار است. از سوی دیگر، متخصصان ایمنی در صنایع فرایندی، از دیدگاه‌های متفاوتی نسبت به شاخص‌های ارزیابی ایمنی سیستم برخوردارند (Omid et al., 2024; Shafahi et al., 2026). این تناظر دیدگاه‌ها، به‌طور طبیعی به سطوح مختلفی از اهمیت برای هر شاخص و در نتیجه، تخصیص وزن‌های متفاوت به اندازه‌گیری‌ها منجر می‌گردد (Omid et al., 2024; Salehi et al., 2023). تخصیص وزن‌های متفاوت به شاخص‌های گوناگون، این امکان را برای مدیران و متخصصان ایمنی فراهم می‌سازد تا راهبردهای متنوعی را در جهت ارتقاء سطح ایمنی تدوین نمایند. شایان ذکر است که عواملی که در یک بافت و زمینه کاری خاص، تاثیرگذارتر تلقی می‌گردند، ممکن است در شرایط متفاوت، اولویت‌های دیگری پیدا کنند و این امر، خود به تنوع راهبردهای مدیریت ایمنی دامن می‌زند. به منظور انطباق با این تنوع دیدگاه‌ها و پیچیدگی‌های ذاتی تصمیم‌گیری در زمینه ایمنی، به کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) به‌عنوان رویکردی کارآمد مطرح گردیده است (Omid & Pilbeam, 2023). در طول دهه گذشته، کاربرد این روش‌ها برای مواجهه با عدم قطعیت‌ها و حل مسائل پیچیده مهندسی، روندی فزاینده یافته است. روش‌های MCDM در موقعیت‌های همراه با عدم قطعیت،

اعم از عدم قطعیت ناشی از ابهام (به دلیل فقدان اطلاعات کامل) یا عدم قطعیت ناشی از قضاوت‌های کیفی تصمیم‌گیرندگان، از کارایی مناسبی برخوردارند. در نتیجه، این روش‌ها برای پرداختن به مسائل دنیای واقعی که در این ویژگی‌ها مشترکند، بسیار سودمند و کاربردی محسوب می‌شوند (Omid & Moradi, 2023).

در میان روش‌های متعدد MCDM، فرایند تحلیل سلسله مراتبی نخستین بار در سال ۱۹۸۰ توسط ساعتی ارائه گردید (TL, 1990). این رویکرد که به عنوان یکی از روش‌های بنیادین تصمیم‌گیری چند معیاره شناخته می‌شود، از کاربردی‌ترین ابزارها برای تلفیق نظرات کارشناسی و ارزیابی امتیازات محسوب می‌گردد. AHP با تجزیه مسائل پیچیده تصمیم‌گیری به اجزای تشکیل دهنده در قالب یک ساختار سلسله مراتبی، امکان تحلیل نظام‌مند سیستم‌های تصمیم‌گیری پیچیده را فراهم می‌آورد (Omid, 2018). روش AHP مزایای قابل توجهی در تصمیم‌گیری در شرایطی که کمی‌سازی عوامل با دشواری همراه است، نشان داده است. این روش، به عنوان یک رویکرد پژوهشی معتبر در علوم ایمنی شناخته می‌شود و کاربرد گسترده‌ای نه تنها در فرایندهای تصمیم‌گیری مدیریتی، بلکه در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی دارد. پژوهشگران متعددی از این روش به عنوان تکنیکی ساختار یافته و ساده برای ارزیابی معیارهای پیچیده و مقابله با تصمیمات مبتنی بر اصول ریاضی بهره گرفته‌اند. همچنین، این چارچوب، ابزاری جامع برای ساختاردهی مسائل تصمیم‌گیری در حوزه‌های گوناگون فراهم می‌آورد (Othman et al., 2016).

بررسی پیشینه پژوهش‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم گستردگی مطالعات در حوزه مدیریت بحران و مکان‌یابی تاسیسات اضطراری در سناریوهایی نظیر انتشار ماده سمی، پژوهش‌های محدود به طور خاص به شناسایی و اولویت‌بندی فاکتورهای مؤثر بر انتخاب محل پناهگاه‌های ایمن و مسیرهای تخلیه اضطراری برای جمعیت‌های در معرض خطر در حوادث مرتبط در صنایع فرایندی، با به کارگیری تکنیک‌های MCDM، پرداخته‌اند. از این‌رو، مطالعه حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی فاکتورهای مؤثر بر مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن و مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی در حوادثی نظیر انتشار مواد سمی، با رویکرد تحلیل سلسله مراتبی AHP طراحی و اجرا گردیده است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند چارچوبی تحلیلی برای مدیران ایمنی و مسئولین مدیریت بحران در صنایع فرایندی فراهم آورد تا ضمن لحاظ نمودن اولویت‌های چندگانه، تصمیمات مبتنی بر شواهد و کارآمدی در زمینه مکان‌یابی پناهگاه‌ها و انتخاب مسیرهای تخلیه اتخاذ نمایند.

روش‌شناسی پژوهش

در مطالعه حاضر، به منظور شناسایی جامع و نظام‌مند فاکتورهای مؤثر بر مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن و مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی، ابتدا مروری بر تعدادی از متون علمی معتبر و مطالعات پیشین در حوزه‌های مدیریت بحران، ایمنی فرایند و مکان‌یابی تاسیسات اضطراری انجام پذیرفت. این مرور، با هدف پوشش حداکثری ابعاد مختلف مسئله و شناسایی معیارهای کلیدی مورد تأکید در ادبیات فنی و تجارب عملیاتی، صورت گرفت. بر اساس یافته‌های حاصل از این مرحله، مجموعه‌ای از معیارها و زیرمعیارهای اولیه استخراج گردید که ابعاد گوناگون موضوع را شامل می‌شدند؛ ابعاد شناسایی شده برای رتبه‌بندی مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن شامل C1: حداقل میزان مواجهه با مواد خطرناک، C2: فاصله از منبع خطر، C3: دسترسی به مسیرهای ایمن، C4: زمان بهینه تخلیه، C5: الزامات محیطی و آب و هوایی، C6: پتانسیل اثرپذیری از حادثه، C7: دسترسی آسان، C8: امکانات اضطراری و زیرساخت‌ها و C9: حداقل زمان دسترسی بودند ((Cao et al., 2022 ; Jiang et al., 2023; Li et al., 2021; Shojae Barjoe, 2021; Zhang et al., 2023)). فاکتورهای شناسایی شده مؤثر بر تعیین مسیرهای تخلیه شامل C1: توزیع جمعیت در محل، C2: چگالی جمعیت (تعداد افراد) در مسیرها، C3: تأثیرپذیری از حادثه، C4: حداکثر ظرفیت مسیر، C5: زمان رسیدن

از مسیر به محل تجمع ایمن و C6: محل خروجی بودند (Georgiadou et al., 2007; Shen et al., 2026; Zhang et al., 2023).

انتخاب خبرگان در پژوهش‌های مبتنی بر روش تحلیل سلسله مراتبی، نقشی تعیین‌کننده در اعتبار نتایج ایفا می‌نماید. در مطالعه حاضر، معیارهای انتخاب متخصصان بر اساس سه مؤلفه اصلی دانش نظری، تخصص عملیاتی و تجربه کاری در حوزه موضوع مطالعه، علاوه بر تمایل به مشارکت و دسترسی‌پذیری در طول فرایند پژوهش، تدوین گردید (Nguyen et al., 2024). بر این اساس، گروه کارشناسی متشکل از ۱۳ نفر از خبرگان شامل ۱۳ نفر از اعضای هیئت علمی حوزه بهداشت حرفه‌ای و ایمنی و مدیریت بحران تشکیل شد. جدول ۱ ویژگی‌های جمعیت‌شناختی متخصصان مشارکت‌کننده در مطالعه را نشان می‌دهد. روش تحلیل سلسله مراتبی به‌عنوان یکی از رویکردهای تصمیم‌گیری چند معیاره، مبتنی بر مقایسات زوجی است و امکان ارزیابی سناریوهای مختلف را در شرایط تصمیم‌گیری پیچیده فراهم می‌سازد. در این روش، مسئله مورد مطالعه با معیارهای متعدد، به‌صورت یک ساختار سلسله مراتبی متشکل از سطوح مختلف تجزیه می‌گردد؛ به گونه‌ای که بالاترین سطح بیان‌گر هدف نهایی، سطوح میانی نشان‌دهنده معیارهای اصلی و زیر معیارها، و پایین‌ترین سطح شامل گزینه‌های تصمیم می‌باشند.

به منظور سنجش درجه اهمیت هر یک از فاکتورهای اثرگذار در قالب یک ماتریس مقایسات زوجی، فاکتورها دو به دو مورد سنجش قرار گرفتند (جدول ۲) و اولویت نسبی هر یک نسبت به دیگری تعیین گردید. در مرحله بعد، با انجام محاسبات مرتبط و نرخ سازگاری، وزن‌های هر عنصر تصمیم بر اساس داده‌های ماتریس‌های مقایسه زوجی محاسبه شد. پرسشنامه مقایسات زوجی بر اساس مقیاس ساعتی استاندارد (۱ تا ۹) طراحی گردید (جدول ۳). این مقیاس که بر مبنای مطالعات روان‌سنجی توسعه یافته است، امکان تبدیل قضاوت‌های کیفی خبرگان به داده‌های کمی را با حفظ سازگاری درونی فراهم می‌سازد (TL, 1990). ترم‌های زبانی این مقیاس شامل سطوحی از "اهمیت یکسان" (امتیاز ۱) تا "کاملاً با اهمیت" (امتیاز ۹) است که امکان بیان دقیق ترجیحات نسبی را برای تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌آورد. از پاسخ‌دهندگان خواسته شد تا اهمیت نسبی رویدادها را بر اساس راهنمای ارائه شده تعیین نمایند. تعداد مقایسات زوجی مورد نیاز برای هر سطح از سلسله مراتب، از طریق رابطه $\frac{n(n-1)}{2}$ تعیین گردید که در آن n تعداد عناصر (معیارها) در آن سطح می‌باشد (Mandali et al., 2025).

جهت محاسبه مقادیر ناسازگاری در قضاوت‌ها از روابط مرتبط با نرخ سازگاری (Consistency Ratio) استفاده شد. مقادیر $R < 0.1$ در قضاوت خبرگان مورد پذیرش قرار می‌گیرد و در غیر این صورت می‌بایست تجدید نظر در قضاوت‌ها صورت پذیرد. برای محاسبه شاخص سازگاری (Consistency Index) رابطه ۱ بکار گرفته شد که در آن λ_{max} بزرگترین مقدار ویژه ماتریس و n تعداد شاخص‌ها در ماتریس قضاوت است.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad [1]$$

برای محاسبه نرخ سازگاری (Consistency Ratio) رابطه ۲ مورد استفاده قرار گرفت (Abdollahpour et al., 2022b). شکل ۱ فلوچارت انجام مطالعه را نشان می‌دهد.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad [2]$$

جدول ۱. مشخصات پاسخ‌دهندگان

Table 1. Characteristics of respondents

تعداد کل - ۱۳		متغیر دموگرافیک
(%)	تعداد	
۱۰۰	۱۳	عنوان سازمانی - عضو هیئت علمی
۳۹	۵	سن (سال)
۲۳	۳	۳- ۳۱-۳۵ سال
۱۵	۲	۴- ۳۶-۴۰ سال
۲۳	۳	۵- ۴۱-۴۵ سال
		۶- بیش از ۴۵ سال
۷	۱	تجربه کاری (سال)
۳۱	۴	۲- ۱-۵ سال
۳۱	۴	۳- ۶-۱۰ سال
۳۱	۴	۴- ۱۱-۱۵ سال
		۵- بیش از ۱۵ سال
۱۰۰	۱۳	سطح تحصیلات - دکتری

جدول ۲. نمونه‌ای از پرسشنامه مقایسه زوجی فاکتورهای مرتبط با انتخاب مسیر تخلیه

Table 2. Sample pairwise comparison questionnaire for factors related to evacuation route selection

فاکتورهای مرتبط با مسیر تخلیه	C1: توزیع جمعیت در محل	C2: چگالی جمعیت (تعداد افراد) در مسیرها	C3: تاثیرپذیری از حادثه	C4: حداکثر ظرفیت مسیر	C5: زمان رسیدن از مسیر به محل تجمع ایمن	C6: محل خروجی
توزیع جمعیت در محل: C1	۱					
چگالی جمعیت (تعداد افراد) در مسیرها: C2		۱				
تاثیرپذیری از حادثه: C3			۱			
حداکثر ظرفیت مسیر: C4				۱		
زمان رسیدن از مسیر به محل تجمع ایمن: C5					۱	
محل خروجی: C6						۱

جدول ۳. مقیاس اندازه‌گیری ساعتی در مقایسه زوجی

Table 3. Hourly measurement scale for pairwise comparison

درجه اهمیت	تعریف	توضیح
۱	اهمیت یکسان	دو معیار به صورت برابر به هدف کمک می‌کنند.
۳	اهمیت متوسط	قضاوت به طور جزئی به نفع یکی از معیارها است.
۵	اهمیت زیاد	قضاوت به طور قاطع به نفع یکی از معیارها است.
۷	اهمیت بسیار زیاد	یک معیار برتری آشکار دارد.
۹	کاملاً با اهمیت	برتری یک معیار بر دیگری در بالاترین سطح ممکن تایید می‌شود.
۲، ۴، ۶ و ۸	مقادیر میانی	برای بیان مقادیر بینابینی بین اولویت‌های فوق به کار می‌روند.



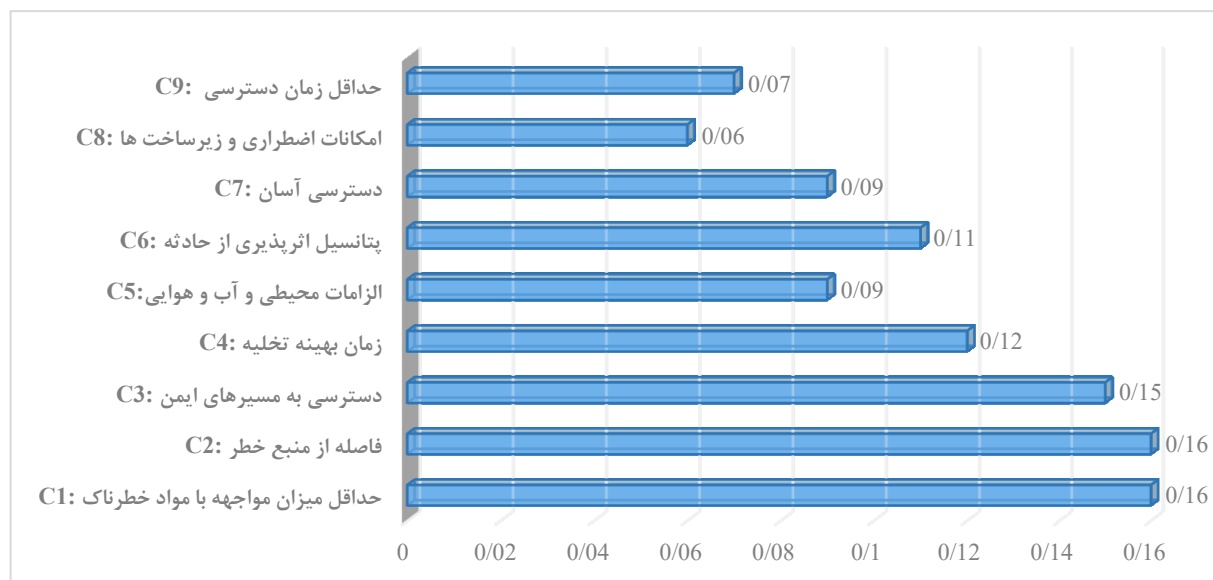
شکل ۱. فلوچارت انجام مطالعه

Figure 1. Study flowchart

یافته‌ها و بحث

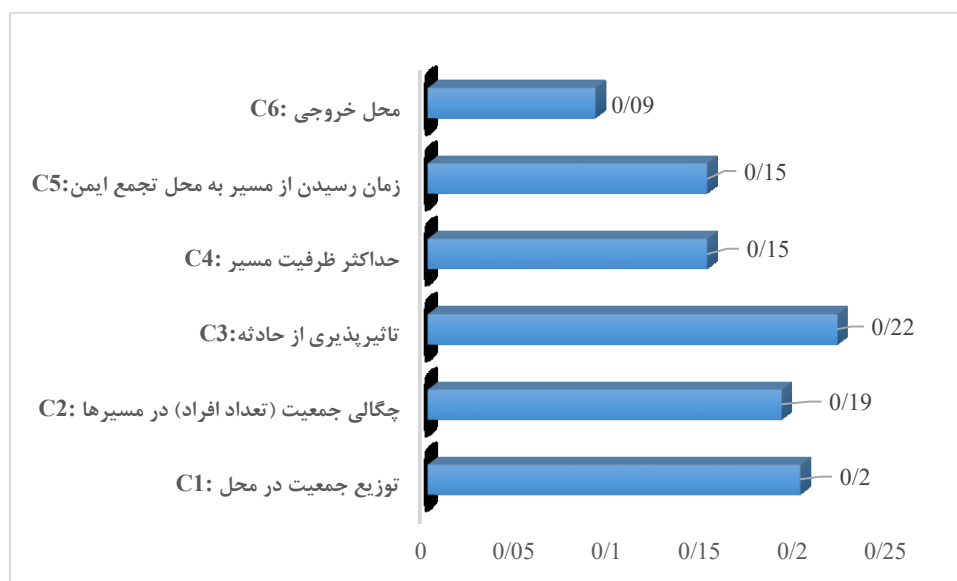
در این مطالعه، به منظور شناسایی و اولویت‌بندی سیستماتیک فاکتورهای کلیدی مؤثر بر مکان‌یابی بهینه پناهگاه‌های ایمن و مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی در حوادثی نظیر انتشار ماده سمی، از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده گردید. ماتریس مقایسات زوجی توسط پنلی از خبرگان صاحب نظر در حیطه موضوعی ایمنی و مدیریت بحران تکمیل شد و وزن‌های نهایی معیارها محاسبه گردید.

نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که معیارهای C1 (حداقل میزان مواجهه با مواد خطرناک) و C2 (فاصله از منبع خطر) با وزن‌های مساوی ۰/۱۶، بالاترین اولویت را در میان شاخص‌های مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن به خود اختصاص داده‌اند. معیار C3 (دسترسی به مسیرهای ایمن) با وزن ۰/۱۵ در رتبه سوم و معیار C4 (زمان بهینه تخلیه) با وزن ۰/۱۲ در رتبه چهارم قرار گرفته است. این چهار معیار (C1 تا C4) بیشترین وزن‌ها را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر غالب این عوامل در فرایند تصمیم‌گیری برای مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن در صنایع فرایندی است. در مقابل، معیارهای الزامات محیطی و آب و هوایی (۰/۰۹)، پتانسیل اثرپذیری از حادثه (۰/۱۱)، دسترسی آسان (۰/۰۹)، امکانات اضطراری و زیرساخت‌ها (۰/۰۶) و حداقل زمان دسترسی (۰/۰۷) از اولویت پایین‌تری برخوردار بوده‌اند. اگرچه معیار پتانسیل اثرپذیری از حادثه با وزن ۰/۱۱ در رتبه پنجم قرار گرفته و نسبت به سایر معیارهای گروه دوم از اهمیت نسبتاً بیشتری برخوردار است، اما همچنان وزن کمتری نسبت به معیارهای اولویت دار (C1 تا C4) دارد. الگوی اولویت‌بندی به دست آمده حاکی از آن است که در طراحی و مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن در صنایع فرایندی، عواملی نظیر فاصله از منابع خطر، دسترسی سریع، ظرفیت کافی پناهگاه و ایمنی سازه‌ای در مقایسه با عواملی مانند وضعیت توپوگرافی و الزامات آب و هوایی، از درجه اهمیت بالاتری برخوردار هستند. شکل ۲ نتایج حاصل رتبه‌بندی فاکتورهای مؤثر بر مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن را نشان می‌دهد.



شکل ۲. وزن فاکتورهای مؤثر بر مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن
Figure 2. Weight of factors affecting the location of safe havens

به منظور شناسایی و اولویت‌بندی عوامل کلیدی مؤثر بر تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی، از فرایند آنالیز سلسله مراتبی استفاده گردید. نتایج حاصل از آنالیز نشان می‌دهد که معیار C3 (تأثیرپذیری از حادثه) با وزن ۰/۲۲، بالاترین اولویت را در میان شاخص‌های تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری به خود اختصاص داده است. معیارهای C1 (توزیع جمعیت در محل) و C2 (چگالی جمعیت (تعداد افراد) در مسیرها) به ترتیب با وزن‌های ۰/۲۰ و ۰/۱۹ در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند (شکل ۳). این سه معیار (C1، C2 و C3) بیشترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند که نشان‌دهنده تأثیر غالب این عوامل در فرایند تصمیم‌گیری برای طراحی مسیرهای تخلیه است. در مطالعه حاضر، نرخ ناسازگاری برای قضاوت کلیه مشارکت‌کنندگان در محدوده قابل قبول (کمتر از ۰/۱) گزارش گردید که نشان از سازگاری درونی و قابلیت اتکای مناسب مقایسات صورت گرفته دارد.



شکل ۳. وزن فاکتورهای مؤثر بر تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری

Figure 3. Weights of factors influencing the determination of emergency evacuation routes.

صنایع فرایندی به دلیل ماهیت عملیاتی خود، همواره با مخاطرات گسترده و پیچیده‌ای از جمله آتش‌سوزی، انفجار و انتشار مواد سمی و خطرناک مواجه هستند. وقوع حوادث در این صنایع می‌تواند علاوه بر خسارات جانی و مالی سنگین، پیامدهای جبران‌ناپذیری برای جوامع پیرامونی و محیط زیست به همراه داشته باشد. در چنین شرایطی، وجود پناهگاه‌های ایمن و مسیرهای تخلیه اضطراری کارآمد، به عنوان دو مولفه اساسی در سیستم مدیریت بحران نقشی حیاتی در کاهش تلفات انسانی و افزایش تاب‌آوری صنایع ایفا می‌کنند. هدف از مطالعه حاضر شناسایی و اولویت‌بندی فاکتورهای مؤثر بر مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن و تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی در مواجهه با سناریوهایی نظیر انتشار مواد سمی با به‌کارگیری رویکرد AHP است.

بر اساس نتایج معیارهای حداقل میزان مواجهه با مواد خطرناک (با وزن ۰/۱۶) و فاصله از منبع خطر (با وزن ۰/۱۶) بالاترین اولویت را در مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن به خود اختصاص داده‌اند. معیار دسترسی به مسیرهای ایمن با وزن ۰/۱۵ و زمان بهینه تخلیه با وزن ۰/۱۲ در رتبه‌های بعدی قرار دارند. این یافته با نتایج مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۲۳) که با استفاده از مدل پخش گاوسی و الگوریتم فلوید به بررسی مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن در صنایع شیمیایی پرداختند، همخوانی کامل دارد. آنها نشان دادند که فاصله از منبع نشت و زمان دسترسی به پناهگاه، از مهمترین

معیارهای تعیین‌کننده در مکان‌یابی پناهگاه‌های اضطراری هستند و در تحلیل ریسک سالیانه نشت گازهای سمی، مناطقی که در معرض غلظت‌های بالای گاز قرار دارند، باید به عنوان مناطق با اولویت پایین برای استقرار پناهگاه در نظر گرفته شوند (Zhang et al., 2023). همچنین، مطالعه Talhofer & Hošková-Mayerov (2019) که به بررسی کاربرد تحلیل چند معیاره در انتخاب مکان مناسب برای استقرار مرکز اضطرار در شرایط بحران پرداختند، نشان دادند که معیارهای فاصله از منابع خطر و دسترسی به راه‌های ارتباطی، از بالاترین وزن‌ها در فرایند تصمیم‌گیری برخوردار هستند. آنها با استفاده از روش SAW^۱ و تحلیل حساسیت بر روی وزن معیارها، نشان دادند که تغییر در وزن معیار دسترسی، تأثیر قابل توجهی بر نتایج نهایی تحلیل دارد. این یافته با اولویت بالای معیار دسترسی سریع در مطالعه حاضر سازگار است و تأکید می‌کند که در شرایط بحرانی، زمان رسیدن به محل‌های ایمن، یکی از تعیین‌کننده‌ترین عوامل در بقای افراد است (Talhofer & Hošková-Mayerová, 2019).

علاوه بر این، مطالعه Cao et al (2022) که به ارائه مدل مکان‌یابی مراکز اضطراری در پارک‌های شیمیایی با هدف پیشگیری از اثر دومینو پرداختند، نشان دادند که در نظر گرفتن فاصله از تاسیسات پرخطر، تأثیر تعیین‌کننده‌ای در جلوگیری از گسترش حوادث دارد. آنها با استفاده از الگوریتم NSGA-II و در نظر گرفتن توابع هدف هزینه و ایمنی، نشان دادند که مکان‌یابی مراکز اضطراری در فاصله‌ای بیش از شعاع ریسک از نقاط حادثه‌خیز، می‌تواند از وقوع اثر دومینو جلوگیری کند. این یافته با نتایج مطالعه حاضر همسو است و نشان می‌دهد که در طراحی پناهگاه‌های ایمن در صنایع فرایندی، رعایت فاصله ایمن از تاسیسات پرخطر، یک الزام اساسی است (Cao et al., 2022).

در مقابل، نتایج مربوط به اولویت‌بندی فاکتورهای موثر بر تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری نشان داد که معیار تأثیرپذیری از حادثه (C3) با وزن ۰/۲۲ بالاترین اولویت را دارد و معیارهای C1 (توزیع جمعیت در محل) و C2 (چگالی جمعیت (تعداد افراد) در مسیرها) در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. این یافته با پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه طراحی مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع پرخطر همخوانی دارد. مطالعه Jiang et al (2023) نشان داد که ایمنی مسیرهای دسترسی و فاصله از مناطق با ریسک بالا، از مهم‌ترین معیارهای تعیین‌کننده در طراحی مسیرهای تخلیه هستند. آنها با استفاده از مدل‌سازی ریسک بهبود یافته و شبیه‌سازی مونت کارلو، نشان دادند که در نظر گرفتن اثر دومینو می‌تواند توزیع ریسک را در مناطق صنعتی به طور چشمگیری تغییر دهد و بر اولویت‌بندی مسیرهای تخلیه تأثیر بگذارد (Jiang et al., 2023). همچنین، مطالعه Zhang et al (2023) با استفاده از مدل پخش گاوسی و الگوریتم فلوید، نشان دادند که در طراحی مسیرهای تخلیه، ایمنی مسیر در برابر غلظت گازهای سمی (نظیر آمونیاک) و زمان در دسترس بودن مسیر از مهم‌ترین معیارها هستند. آنها با شبیه‌سازی نشت لحظه‌ای آمونیاک و تحلیل غلظت گاز در گره‌های شبکه تخلیه، نشان دادند که مسیرهایی که در معرض غلظت‌های بالاتر از آستانه مجاز قرار می‌گیرند، باید از شبکه تخلیه حذف شوند و مسیرهای جایگزین با کمترین مواجهه با مخاطرات انتخاب گردند (Zhang et al., 2023).

مطالعه Ayyildiz et al (2025) که با استفاده از رویکرد فازی شهودی^۲ و روش‌های EDAS و SWARA به انتخاب مکان مراکز پاسخ‌گویی اضطراری در مناطق صنعتی پرداختند، نشان داد که در انتخاب مکان این مراکز، معیارهای دسترسی بیشترین اهمیت را دارند، اما در طراحی مسیرهای تخلیه، معیارهای عملیاتی مانند وجود مسیرهای خروج و ایمنی مسیر از اهمیت بالاتری برخوردارند. آنها با تحلیل حساسیت و بررسی سناریوهای مختلف وزنی، نشان دادند که تغییر در وزن معیارهای ایمنی مسیر می‌تواند رتبه‌بندی گزینه‌های مکان‌یابی را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد (Ayyildiz et al., 2025).

1. simple additive weighting
2. Intuitionistic Fuzzy

یافته‌های مطالعه حاضر دارای پیامدهای مدیریتی برای صنایع فرایندی است. نخست، مدیران ایمنی و برنامه‌ریزان می‌بایست در مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن، اولویت نخست را به معیارهای فاصله از منابع خطر و دسترسی سریع اختصاص دهند و از استقرار پناهگاه‌ها در مجاورت تاسیسات پرخطر و مناطق با ریسک بالا خودداری کنند. دوم، در طراحی مسیرهای تخلیه اضطراری، معیار ایمنی مسیر در برابر مخاطرات فرایندی (مانند انتشار گازهای سمی، حریق و انفجار) باید در اولویت بالا قرار گیرد و مسیرهایی انتخاب شوند که کمترین میزان مواجهه با مخاطرات را داشته باشند. سوم، با توجه به تفاوت معنادار الگوی اولویت‌بندی، نمی‌توان از یک چارچوب واحد برای طراحی پناهگاه‌ها و مسیرهای تخلیه استفاده کرد و هر یک نیازمند تحلیل و برنامه‌ریزی مجزا هستند.

مطالعه حاضر دارای محدودیت‌هایی است که می‌بایست در تفسیر نتایج مورد توجه قرار گیرند. یک محدودیت مهم، به ترکیب پنل خبرگان باز می‌گردد. اگرچه مشارکت خبرگان دانشگاهی و صاحب نظران حوزه ایمنی صنعتی و مدیریت بحران، اعتبار محتوایی مناسبی به فرایند مقایسات زوجی بخشیده است، اما اتکای صرف بر خبرگان دانشگاهی و عدم بهره‌گیری هم‌زمان از خبرگان عملیاتی با تجربه مستقیم میدانی، می‌تواند بر تعمیم‌پذیری نتایج تأثیرگذار باشد. گرچه در مطالعه حاضر، نرخ ناسازگاری برای قضاوت کلیه مشارکت‌کنندگان در محدوده قابل قبول (کمتر از ۰/۱) محاسبه و تایید گردید که نشان‌دهنده سازگاری درونی و قابلیت اتکای مناسب مقایسات صورت گرفته است. با این حال، یکی از محدودیت‌های این مطالعه، فقدان تحلیل حساسیت جهت بررسی تأثیر تغییرات وزن معیارها بر رتبه‌بندی نهایی و پایداری نتایج در سناریوهای مختلف وزنی می‌باشد که انجام آن می‌توانست اعتبار و استحکام تصمیمات اتخاذ شده را به طور قابل توجهی افزایش دهد. همچنین، اگرچه از نظرات متخصصان حوزه ایمنی و مدیریت بحران بهره‌گیری شد، حجم نمونه محدود و ماهیت ذاتی روش AHP که بر قضاوت‌های افراد استوار است، می‌تواند بر طیف دیدگاه‌ها و اولویت‌بندی نهایی تأثیرگذار بوده باشد. به علاوه، تمرکز مطالعه حاضر بر شناسایی و اولویت‌بندی معیارهای مؤثر بوده و راهکارهای عملیاتی دقیق برای پیاده‌سازی هر یک از معیارها ارائه نگردیده است. انجام پژوهش‌های آتی با رویکردهای ترکیبی نظیر Fuzzy AHP برای مواجهه با عدم قطعیت ذهنی، ANP (فرایند تحلیل شبکه‌ای) به منظور لحاظ کردن وابستگی‌ها و بازخوردهای بین معیاری، GIS-based MCDM برای مکانی سازی اولویت‌ها، و شبیه‌سازی دینامیک سیستم‌ها برای ارزیابی پویای عملکرد معیارها در شرایط زمانی و مکانی متفاوت، پیشنهاد می‌شود. به‌ویژه، بکارگیری همزمان تکنیک‌های MCDM با شبیه‌سازی می‌تواند امکان اعتبارسنجی نتایج اولویت‌بندی را در سناریوهای عملیاتی متنوع فراهم آورد و اثرات دومینو و عدم قطعیت‌های محیطی را به‌صورت واقع‌گرایانه‌تری مدل نماید. همچنین، انجام مطالعات میدانی با نمونه‌های آماری گسترده‌تر و آزمون حساسیت بر روی وزن‌های حاصل، می‌تواند به افزایش استحکام و کاربردی‌پذیری یافته‌ها در شرایط مختلف بحرانی کمک کند. علاوه بر این، انجام اعتبارسنجی میدانی از طریق مطالعه میدانی در یک منطقه واقعی با جمعیت هدف، می‌تواند میزان انطباق اولویت‌های نظری با شرایط عملیاتی را بسنجد و نقاط قوت و ضعف هر معیار را در مواجهه با پیچیدگی‌های عینی آشکار سازد. این اعتبارسنجی میدانی، به‌ویژه در کنار شبیه‌سازی، امکان مقایسه خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهده شده از تخلیه‌های واقعی (یا تمرینات عملیاتی) را فراهم نموده و به اصلاح وزن‌ها و افزایش استحکام مدل کمک شایانی می‌کند.

نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با هدف شناسایی و اولویت‌بندی فاکتورهای مؤثر بر مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن و مسیرهای تخلیه اضطراری در صنایع فرایندی در مواجهه با سناریوهایی نظیر انتشار مواد سمی با به کارگیری رویکرد AHP انجام شد و نتایج نشان داد که در مکان‌یابی پناهگاه‌های ایمن، معیارهای "حداقل میزان مواجهه با مواد خطرناک" و "فاصله از

منابع خطر" با وزن مساوی ۰,۱۶, بالاترین اولویت را دارند. در رتبه‌های بعدی، معیارهای "دسترسی به مسیرهای ایمن" و "زمان بهینه تخلیه" قرار می‌گیرند که بیانگر اهمیت حیاتی فاصله‌گیری از مخاطرات و سرعت دسترسی در طراحی پناهگاه‌هاست. در مقابل، در تعیین مسیرهای تخلیه اضطراری، معیار "تأثیرپذیری از حادثه" با وزن ۰,۲۲، بیشترین اهمیت را داشته و معیارهای "توزیع جمعیت در محل" و "چگالی جمعیت در مسیرها" در اولویت‌های بعدی قرار گرفته‌اند که نشان دهنده لزوم اولویت‌دهی به ایمنی مسیر در برابر مخاطرات فرایندی است. بر اساس این یافته‌ها، مهندسان ایمنی می‌بایست در مکان‌یابی پناهگاه‌ها، حداقل فاصله ایمن را بر اساس مدل‌سازی پیامد سناریوهای بحرانی نظیر انفجار و انتشار گازهای سمی محاسبه و پناهگاه‌ها را خارج از شعاع خطر استقرار دهند. همچنین، در طراحی مسیرهای تخلیه، گره‌های شبکه‌ای که در معرض اثر دومینو قرار دارند، باید از شبکه حذف و مسیرهای جایگزین با کمترین میزان مواجهه با مخاطرات با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مسیر تعیین گردند. ظرفیت مسیرهای تخلیه نیز می‌بایست بر اساس حداکثر جمعیت شناور و شاغل در هر شیفت محاسبه شده و گلوگاه‌های احتمالی از طریق افزایش پهنای مسیر یا ایجاد مسیرهای موقت برطرف شوند تا زمان تخلیه بهینه گردد. در بازنگری طرح‌های جامع پاسخ به شرایط اضطرار، معیارهای با وزن بالاتر به‌عنوان شاخص‌های کلیدی عملکرد تعریف شده و میزان انطباق پناهگاه‌ها و مسیرهای موجود با این شاخص‌ها، پایش گردد. برای واحدهای در حال احداث، نتایج این مطالعه می‌تواند در مرحله طراحی مفهومی به عنوان چک لیست الزامات ایمنی مورد استفاده قرار گیرد تا از بروز هزینه‌های اصلاحی در مراحل بعدی پیشگیری شود. در نهایت، اولویت‌دهی به معیارهای فاصله از منابع خطر و ایمنی مسیر در طراحی سیستم‌های مدیریت اضطراری، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش تلفات انسانی، جلوگیری از پیامدهای ناشی از اثرات دومینو و افزایش صنایع فرایندی ایفا کند و چارچوب عملیاتی این مطالعه، ابزاری کارآمد برای مهندسان ایمنی و مدیران بحران در راستای ارتقاء سطح ایمنی واحدهای صنعتی با ریسک بالا فراهم می‌آورد.

References

- Abdollahpour S, B. A., Akbari H, Khajevandi A. . (2022a). Assessment of the Resilience Culture of Safety Management Systems by Hierarchical Analysis Method; Case Study: Metal Industries in Countries, 2021. *Journal of Occupational Hygiene Engineering* ۵۴-۴۶, (۱)۹.
- Abdollahpour S, B. A., Akbari H, Khajevandi A. . (2022b). Assessment of the Resilience Culture of Safety Management Systems by Hierarchical Analysis Method; Case Study: Metal Industries in Countries, 2021. *Journal of Occupational Hygiene Engineering*, 9(1), 46-54 .
- Ayyildiz, E., ERDOĞAN, M., & Gul, M. (2025). An integrated intuitionistic fuzzy framework for emergency response center location planning in industrial areas. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 100813 .
- Cao K ,L. L., Liu Y, Wang L, Choi KN, Gao J. . (2022). Research on the siting model of emergency centers in a chemical industry park to prevent the domino effect. *Processes*, 10(11), 2287 .
- Georgiadou PS, P. I., Kiranoudis CT, Markatos NC. . (2007). Modeling emergency evacuation for major hazard industrial sites. . *Reliability Engineering & System Safety*, 92(10), 1388-1402 .
- He S, S. S., Lin Z, Lu Y, Li H. . Dec 30:112178. (2025). Optimization of decision-making in safety investments for domino accident prevention in chemical industrial parks based on system dynamics. *Reliability Engineering & System Safety*, 270, 112178 .
- He, Z., Weng, W., Huang, X., Lan, M., & Shen, K. (2025). The decision-making between evacuation and shelter-in-place (SIP) in case of multi-hazard chemical accidents. *Chemical Engineering Transactions*, 116, 463-468 .
- Jiang J, Z. X., Wei R, Huang S, Zhang X. S. (2023). Study on location of fire stations in chemical industry parks from a public safety perspective: Considering the domino effect and the identification of major hazard installations for hazardous chemicals. *Fire*, 6(6), 218 .

- Kourniotis SP, K. C., Markatos NC. (2000). Statistical analysis of domino chemical accidents. *Journal of hazardous materials*, 71(1-3), 239-252 .
- Li AC, N .L., Xu N, Davidson R. (2012). Shelter location and transportation planning under hurricane conditions. . *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review.*, 48(4), 715-729 .
- Li, D., H. H., Yang J. (2021). *Two-stage optimization study on location and layout of emergency resources in chemical parks*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science ,
- Mandali, H., K. E., Ebrahimi H, Hanifi SM, Ayat SM, Ghashghaei M. . (2025). Machine learning and bayesian network based on fuzzy AHP framework for risk assessment in process units. *Scientific Reports.*, 15(1), 39083 .
- Nguyen, P.T., N. Q., Huynh VDB, Nguyen LT. (2024). E-learning quality and the learners' choice using spherical fuzzy analytic hierarchy process decision-making approach. *Vikalpa*, 49(2), 143-156 .
- Omidi, L., B. M., Dolatabad, K.M., Zakerian, S.A., Azam, K. (2024). Mindful organizing mediates the relations between group safety climate and safety-related behaviors among operating room team members. *Perioperative Care and Operating Room Management.*, 34, 100351 .
- Omidi, L., D. K., Pilbeam, C. (2023). Differences in perception of the importance of process safety indicators between experts in Iran and the West. *Journal of safety research*, 84, 261-272 .
- Omidi, L., K. H., Moradi, G. (2023). Assessment of emergency risk management and resilience engineering at management levels of a high hazard industry. *Safety and reliability* .
- Omidi, L., M. G., Salehi V, Khosravifar M. (2024). A multi-criteria decision-making approach for prioritizing factors influencing healthcare workers' safety performance: A case of a women's hospital. *Journal of Safety and Sustainability.*, 1(3), 173-180 .
- Omidi, L., Z. S., Saraji, J.N., Hadavandi, E., Yekaninejad, M.S. (2018). Prioritization of human factors variables in the management of major accident hazards in process industries using fuzzy AHP approach. *Health scope*, 7(4), e61649 .
- Osman, M.S., R. B. (2012). *Application of static uncapacitated multi-commodity flow models to dynamic capacity-constrained evacuation path networks*. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management
- Osman, M.S., R. B. (2013). Two-phase evacuation route planning approach using combined path networks for buildings and roads. *Computers & Industrial Engineering*, 65(2), 233-245 .
- Othman, M.R., I. R., Hassim MH, Ibrahim WHW. (2016). Prioritizing HAZOP analysis using analytic hierarchy process (AHP). *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(5), 1345-1360 .
- Pérez-Galarce, F., C. L., Vergara, C., Candia-Véjar, A. (2017). An optimization model for the location of disaster refuges. *Socio-Economic Planning Sciences.*, 59, 56-66 .
- Salehi, V., M. G., Omidi, L., Rahimi, E. (2023). An MCDM approach to assessing influential factors on healthcare providers' safe performance during the COVID-19 pandemic: Probing into demographic variables. *Journal of Safety Science and Resilience.*, 4(3), 274-283 .
- Shafahi, M., D. K., Juybari, M.N., Omidi, L. (2026). Prioritizing Factors Influencing Failure in the Crisis Management System of a Process Industry Using the Analytic Hierarchy Process. *Journal of Health and Safety at Work*, 16(1), 168-187.
- Shen, Y., W. Q., Yan, W., Sun, J. (2015). An evacuation model coupling with toxic effect for chemical industrial park. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.*, 33, 258-265 .
- Shojaee Barjoe, S., N. M., Malverdi, E., Mahmoud, Z., Abadi, S., Naghdi, M.R. (2021). Modeling the consequences of benzene leakage from tank using ALOHA in Tar Refining Industrial of Kerman, Iran. *Pollution*, 7(1), 217-230.
- Talhofer, V., & Hošková-Mayerová, Š. (2019). Method of selecting a decontamination site deployment for chemical accident consequences elimination: application of multi-criterial analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(1), 171.
- TL., S. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26 .
- X., W. (2026). Spatially Constrained Evacuation Route Optimization for LPG Leakage Accidents in Chemical Industrial Parks. . *Processes*, 14(13), 2222 .

- Zhang, D., M. Z., Gong, M., Ren, J., Zuo, S., Chen, X. (2023). Study on optimization of shelter locations and evacuation routes of gas leakage accidents in chemical industrial park. *Process Safety and Environmental Protection*, 177, 556-567 .
- Zhang, J.H., S. X., Zhu, R., Li, M., Miao, W. (2017). Solving an emergency rescue materials problem under the joint reserves mode of government and framework agreement suppliers. . *Plos one*, 12(10), e0186747 .
- Zhang, N., S. S., Zhou, A.N., Chen, J. (2019) .A brief report on the March 21, 2019 explosions at a chemical factory in Xiangshui, China. *Process Safety Progress*, 38(2), e12060 .
- Zhao, X., C. J., Xu, W., Lou, S., Du, P., Yuan, H., Ip, K.P. (2019). A three-stage hierarchical model for an earthquake shelter location-allocation problem: case study of Chaoyang District, Beijing, China. *Sustainability*, 11(17), 4561 .